

Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash - Perú, usando tecnologías de humedales artificiales

Adaptation of a waste water treatment system in the urban community of Lacabamba, Ancash region, Peru, using the artificial wetlands technology

Daniel Lovera D.^{*}, Lawrence Quipuzco U.^{**}, Gaudencio Laureano V.^{**}, Carolina Becerra M.^{**}, Nadezhda D. Valencia P.^{**}

RESUMEN

El presente artículo presenta los resultados obtenidos en la investigación realizada por el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (II GEO - UNMSM), en el distrito de Lacabamba en el proyecto «*Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, Región Ancash, Perú; Usando tecnologías de humedales artificiales*». Este proyecto fue seleccionado en el 2003, por el Programa Pequeños Fondos Competitivos para Investigación del *Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y Caribe, SEMA / EMS* y del *International Development Research Centre, IDRC* de Canadá. La Convocatoria 2003 del SEMA - IDRC se centró en el uso sustentable del agua en las áreas urbanas.

Este proyecto tuvo como objetivo implementar y evaluar el sistema integral de manejo de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, mediante el uso del sistema de humedales artificiales para tratar las aguas y su reutilización en un biohuerto comunal, como una tecnología innovadora para reducir, la contaminación de las fuentes superficiales de agua; proteger la salud de los habitantes y evitar el deterioro del medio ambiente; así como involucrar a la población en su Plan de Desarrollo Sostenible al 2015 del distrito de Lacabamba y participe activamente en los programas de sensibilización y capacitación del proyecto de Investigación.

Palabras clave: Humedal artificial, Reuso de aguas residuales tratadas, Biohuerto comunal.

ABSTRACT

The present article presents the results obtained during the process of study and investigation carried out by the Research Institute of the Faculty of Geological, Geographical, Metallurgical and Miner Engineering of the San Marcos National University (II GEO - UNMSM) and the urban community of Lacabamba in the project «*Adaptation of a waste water treatment system in the urban community of Lacabamba, Ancash region, Peru, using the artificial wetlands technology*», project selected for its financing in the last 2003 call of the Small Competitive Funds Program for Investigation of The Environmental Management Secretariat for Latin America and the Caribbean - EMS and of the International Development Research Centre, IDRC of Canada. The 2003 call of the EMS - IDRC was about the sustainable use of the water in the urban areas. This project had as objective to implement and to evaluate an integral system of management of residual water in the urban community of Lacabamba by means of use of the systems of artificial wetlands to treat the water and its reuse in a community bio-vegetable garden, as an innovative technology to reduce the contamination of the superficial sources of water, to protect the health of the people and to avoid the deterioration of the environment; as well as to sensitize to the population so that to be involved in the elaboration of the 2015 Sustainable Development Plan of the District of Lacabamba.

Keywords: Artificial wetland, Wastewater reuse, Community bio-vegetable garden.

* Director del II GEO - UNMSM. E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe

** Consultor del II GEO - UNMSM. E-mail: lawrence99quipuzco@yahoo.es

ANTECEDENTES

El proyecto «*Adaptación de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad Urbana de Lacabamba, Región Ancash, Perú; Usando Tecnologías de Humedales Artificiales*» fue seleccionado en la convocatoria 2003 por el Programa Pequeños Fondos Competitivos para Investigación del Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y Caribe (SEMA / EMS) y del International Development Research Centre, IDRC de Canadá.

La Convocatoria se centró en el tema de Asociaciones Multisectoriales para la Gestión Sustentable del Agua en las ciudades de América Latina y el Caribe: Nuevos modelos institucionales para la gestión ambiental urbana.

El presente artículo presenta los resultados de la investigación realizada por el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (IIGEO – UNMSM) en el distrito de Lacabamba.

INTRODUCCIÓN

Lacabamba, es un distrito de 180 km², se ubica en la microcuenca del río Conchucos, en la cordillera negra de los Andes del Norte del Perú (Foto 1), tiene una altitud promedio de 3346 msnm, sus coordenadas son de 8°15'30" de latitud Sur y 77°55'10" de longitud Oeste. Se caracteriza por su clima templado en la región Quechua y frío en la zona de Puna, su temperatura fluctúa entre los 10 y 20 °C, tiene abundantes precipitaciones en los meses de enero a abril. Lacabamba tiene una población de 3450 habitantes, su actividad económica es la agricultura tradicional y de autoconsumo.

Por el Convenio Marco firmado entre la Municipalidad y UNMSM (IIGEO), en el año 2003, se elaboró el Plan de Desarrollo del 2003 al 2012 con la participación activa de la población.



Foto 1. Vista panorámica de la comunidad urbana de Lacabamba.

En el contexto del PDSL, el IIGEO-UNMSM, presenta el proyecto «Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, Región Ancash, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales», al Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y Caribe (SEMA / EMS) y del International Development Research Centre, IDRC de Canadá, y es seleccionado.

El proyecto se ejecutó con la firma de un Convenio entre SEMA / EMS en nombre del International Development Research Centre, IDRC; y las autoridades de la Municipalidad del distrito de Lacabamba en el 2005.

La investigación aplicada se inició coordinando con las autoridades del municipio para que se desarrolle el proyecto: «Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, Región Ancash, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales», y por otro lado la realización de la Consulta Ciudadana, (aprobación del Plan de Desarrollo Sostenible del Distrito de Lacabamba al 2012), permitió presentar el proyecto de investigación, a la población como un logro de los talleres participativos desarrollados durante los años 2002 al 2004.

OBJETIVOS

Objetivo general

Implementar y evaluar un sistema integral de manejo de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba mediante el uso de sistemas de humedales artificiales para tratar las aguas servidas y su reutilización en un biohuerto comunal, como una tecnología innovadora y limpia para reducir la contaminación de las fuentes superficiales de agua, proteger la salud de los habitantes y evitar el deterioro del medio ambiente.

Objetivos específicos

- Implementar y evaluar un sistema innovador de tratamiento de aguas residuales de alta eficiencia, fácil manejo y bajo costo en la comunidad urbana de Lacabamba, a través de la construcción de un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial.
- Instalar y evaluar nuevas opciones para la reutilización de las aguas residuales tratadas del humedal en un biohuerto comunal, con el propósito de ofrecer al proyecto un concepto integral del manejo de las aguas residuales.
- Establecer coordinación interinstitucional, para la sostenibilidad del sistema de tratamiento y

reuso de aguas residuales, sensibilización y capacitación de la educación local y participación de la población en el cuidado del ambiente y en la construcción del Plan de Desarrollo Sostenible del Distrito de Lacabamba al 2015.

INICIO DEL PROYECTO

El equipo técnico de IIGEO-UNMSM inspeccionó el terreno a 300 m del centro urbano, cerca al tanque de aguas residuales, cedido por el municipio de Lacabamba para instalar el humedal artificial y biohuerto comunal (Foto 2).

El tanque de aguas residuales se detectó en mal estado, sin expediente técnico; este fue construido en 1996 por el Fondo Nacional de Compensación y Desarrollo Rural - FONCODES (Presidencia de la República), se planteó rediseñarlo para reserva y tratamiento primario de las aguas residuales para abastecer el humedal artificial que se construiría.



Foto 2. Inspección del tanque Imhoff y el lugar del proyecto por el equipo técnico IIGEO - UNMSM.

Descripción del tanque

El tanque es de concreto armado de 4.5 m de largo, 3,5 m de ancho y 4 m de profundidad, tiene una tubería de entrada al tanque de 6" de diámetro de PVC dos tuberías de salida de PVC localizadas a 2,0 m del nivel superior del tanque. De salida tiene dos tuberías de PVC de 6" de diámetro, llave de 6", después de la llave no existe tubería de evacuación. La otra tubería de salida también de 6" de PVC se encuentra a 3.70 m desde el nivel superior del tanque. A la salida de ésta, la tubería se interconexiona con un lecho de secado de lodos localizado a 5 m de distancia del tanque.

Como el tanque no trata las aguas residuales, todo el caudal que entraba al tanque salía por la tubería al lecho de secado, sin llenar el tanque, por lo que se constituía sólo en un receptor de paso del agua

residual. El tanque recibe un caudal entre los 104-106 m³/día, de aguas residuales domésticas de una población de 1300 personas.

Lecho de secado de lodos

El lecho de secado de lodos tiene una área de 110 m² de $A \times L \times p = 10 \times 11 \times 0.6$ m.

La tubería de 6" de diámetro de PVC conexiona el tanque con el lecho que alimenta a cuatro puntos, cada uno de las cuales tiene su respectiva loza. El lecho consta de dos tuberías de salida que evacúan las aguas a una acequia colindante. Este lecho de secado, por falta de mantenimiento, estaba saturado con lodo y vegetación, desconociéndose la conformación del medio filtrante, y no cumplía los requerimientos mínimos para el cual fue construido. (Foto 3).



Foto 3. Acumulación de lodo, agua y vegetación en el lecho de secado de lodos antes del inicio del proyecto.

Evaluación

El equipo técnico realizó los cálculos de diseño determinando que el tanque podía soportar el tratamiento de 104-106 m³/día, de aguas residuales, disponiéndose:

- Sacar la llave 6" del tanque, para su mantenimiento verificando su buen estado y se instaló en la tubería de salida del tanque hacia el lecho de secado, cerrando la llave para almacenar 23 m³, lo que permitirá el tratamiento primario de las aguas residuales mediante el proceso de sedimentación y decantación de sólidos. Previamente se instaló otra salida a través de una red de tuberías de PVC de 6" de diámetro ubicada a 2.55 m debajo de la parte superior del tanque, para que una vez llenado el tanque evacúe las aguas residuales mejoradas hacia la acequia. Comprobado el funcionamiento y llenado del tanque, se procedió a instalar otra salida a través de una tubería de PVC de 2" de diámetro y una llave compuerta que abastecerá de agua residual al humedal artificial.

- En el lecho de secado de lodo, se retiró el lodo y la vegetación que había allí y se colocó capas de filtro de arena y grava.

METODOLOGÍA

La propuesta estuvo conformada por tres componentes que se desarrollaron a través de las siguientes actividades:

Implementación y evaluación del humedal artificial

Trabajos previos

Se identificó el lugar donde se instalaría el humedal artificial, el terreno tenía una pendiente 12% por lo que se consideró excavar y construir un terraplén con la tierra excavada y con piedras formar muros de sostenimiento en los lados del humedal (véase Foto 4). En campo se dimensionó el humedal de $A \times L \times p = 6.5 \times 9.0 \times 0.45$ m.

Así mismo se determinó el uso de materiales del lugar, como: 11.934 m³ de piedra chancada, 5.616 m³ de arena gruesa, 7.02 m³ de confitillo, 130 m² de geomembrana de PVC, 88 m² de geotextil, tuberías de PVC 2", llaves compuertas, pegamento, mallas, otros.



Foto 4. Construcción de muros de sostenimiento en las paredes del humedal.

Diseño

Las características y parámetros de diseño que presenta el humedal horizontal se presentan en el Cuadro 1.

Instalación del humedal artificial

El humedal construido en la comunidad urbana de Lacabamba es de flujo horizontal subsuperficial, de un área total de 58,5 m², con $A \times L \times p = 6,5 \times 9,0 \times 0,45$ m y borde libre de 0,33 m. La superficie del suelo del humedal tiene una pendiente descendente

en el sentido del flujo de 1% para asegurar una buena capacidad hidráulica. La base y los taludes del humedal está revestidas con geomembrana de PVC de color negro de 0,5 mm de espesor como impermeable y encima un geotextil Pavco NT 3000 como refuerzo para la distribución de cargas del medio filtrante (Foto 5).

Cuadro 1. Estimación de los parámetros de diseño del humedal en Lacabamba.

Nº	Parámetros de diseño	Humedal horizontal
1	Flujo	Subsuperficial
2	Sección superficial	Subsuperficial
3	Área superficial (m ²)	58,5000
4	Profundidad (m)	0,4500
5	Porosidad del medio	0,4876
6	Volumen efectivo (m ³) (3" x 4" x 5")	12,8400
7	Tiempo de retención (d)	4,2800
8	Caudal (m ³ /d) (6/7)	3,0000
9	Tasa de aplicación hidráulica (m ³ /m ² - d) (8/3)	0,0500



Foto 5. Colocación de la geomembrana de PVC y del geotextil.

Teniendo en cuenta los criterios de diseño, el medio poroso está constituido por un substrato de grava y arena usando 3 tamaños de material dispuestos desde el fondo hacia arriba: piedra chancada (1" de Ø) con una altura de 0,15 m; confitillo (3/8") con una altura de 0,10 m; arena gruesa con una altura de 0,15 m y confitillo (3/8") con una altura de 0,05 m. (Foto 6).



Foto 6. Colocación del medio filtrante en el humedal.

En la cabecera del humedal se instaló un sistema de ingreso de agua a través de un codo y una tubería de PVC transversal perforada con el objetivo de distribuir el agua de modo uniforme. Esta tubería se cubrió con una capa de grava de 1/2" de diámetro. Igualmente la tubería que recoge el agua residual tratada está conformada por una tubería de PVC de 2" de diámetro con perforaciones de 10 mm de diámetro recubierta con una capa de 1" de diámetro.

La entrada de agua residual al humedal se reguló por medio de una llave compuerta de 2" de diámetro. El humedal se construyó para operar un flujo promedio de 3 m³/día.

La carga hidráulica o tasa de aplicación hidráulica en el humedal es de 0,051 m/día, con una capacidad de almacenamiento de 12,84 m³ de agua residual. En el humedal se sembró rizomas de carrizo o caña brava, con una tasa de transplante de rizomas de 5 plantas/m², para que garantice una buena cobertura a los tres o cuatro meses de sembró (Foto 7).



Foto 7. Vista del humedal artificial con carrizos sembrados.

Monitoreo del humedal artificial

- **Análisis del agua residual**

Se evaluó los parámetros del afluente y efluente del sistema como: sólidos suspendidos, bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total y coliformes fecales, para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes en las aguas residuales del sistema de humedales. Se tomaron muestras durante los meses de octubre y diciembre del 2005. Los monitoreos se realizaron: el 18 de octubre, 15 de noviembre y 08 de diciembre del 2005.

- **Vegetación en el humedal artificial**

La observación del color, fortaleza y tamaño de las plantas fue importante para determinar la tendencia de crecimiento y de adaptación de los carrizos.

BIOHUERTO COMUNAL

Trabajos previos

Para instalar el biohuerto comunal, se realizó una encuesta participativa, en el distrito de Lacabamba, durante la apertura de la Consulta Ciudadana, con el objetivo de identificar los tipos de cultivos.

Por la sugerencia de la mayoría de la población se sembraría hortalizas y plantas aromáticas en el biohuerto, considerando que en la investigación se analizaría el comportamiento de las plantas regadas con aguas tratadas del humedal, pero además se sembraría plantas ornamentales y plantas madereras como una alternativa.

En el aspecto ambiental, se recabó información sobre la textura del suelo y la disposición del terreno a la labranza, asimismo, en campo se tomaron tres muestras de suelo, cada una de 1kg de peso, para analizarlas en el laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina-UNALM, como resultado se clasifica un suelo Franco-Arcilloso (FA), con alto contenido de materia orgánica (80%) y una ligera tendencia a la acidez.

Por otro lado, en el 50% del área asignada al biohuerto nos encontramos con dificultades en el nivel freático a una profundidad de 50 cm. Este hecho condujo al movimiento y labranza del suelo y posterior secado al sol, durante períodos entre 15 a 30 días. Por un proceso regular de concertación técnica, se sugirió tomar 190 m², de los cuales 130 m² restantes serían empleados como lotes de investigación adjunto al proyecto.

Diseño

Con la selección del área y considerados los factores ambientales, se realizó la distribución espacial de los lotes con su correlativo sistema de siembra y sistema de riego tecnificado, determinándose distribuir tres zonas: con los cultivos de hortalizas y/o aromática, planta ornamental y planta forestal.

En cuanto al sistema de riego se optó por el SRLAF (goteo), con tres tipos de goteros (regulables, autocompensados y piquetas).

Instalación

Se inicia con la delimitación del área: 190 m², divididas en tres módulos de cultivo, de 8x10, 9x10 y 2x10 m². El proceso de labranza incluye:

- *Limpieza*: Retiro de escombros, material inorgánico.
- *Deshierbe*: Retiro de malezas y hongos.
- *Nivelación*: El terreno del huerto no estuvo alineado, se niveló para que el riego fuera óptimo.
- *Apertura de canales de drenaje*: Se abrió 3 drenes de 70 cm de profundidad y de 20 m de longitud, para la evacuación simultánea del agua freática.
- *Relleno*: Al 30% del área del biohuerto, se incorporó tierra seca proveniente del lecho de secado del tanque.
- *Abonado*: Se incorporó 200 kg de abono de carnero de la zona.
- *Preparación de surcos*: Se trazaron 37 líneas de 10 m de longitud, separadas cada 50 cm.
- *Montaje del SRLAF (goteo)*: Se instalaron 37 mangueras PEBD 16 mm, de 10 m c/u, con emisores insertados cada 30 cm, para los casos de goteros regulables y autocompensados y 10 cm de separación entre plantas, para el caso de forestales.

Los goteros regulables y las piquetas arrojan la cantidad de agua de acuerdo a la duración del riego, no teniendo un promedio estimado estándar.

En el caso de goteros autocompensados, la descarga aproximada es de 0.10 L/h. Estas mangueras se conectaron a una tubería de conducción PEBD 32 mm, la que a su vez, está conectada al cabezal hidráulico del sistema.

El cabezal hidráulico, tiene un manómetro de glicerina, filtro de mallas 120 mesh, válvula de apertura, codo y uniones roscadas. Este cabezal se conecta a una tubería de salida del humedal de 2". Una vez que se conecta a la tubería de conducción principal, se reduce a 1" (Fotos 8 y 9).

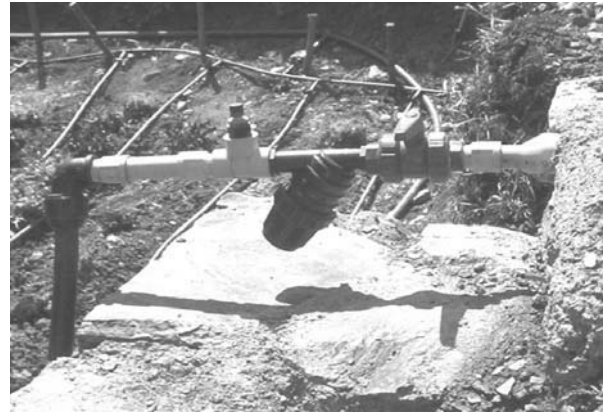


Foto 8. Vista de llave y filtro de malla instalado en la salida del humedal artificial.



Foto 9. Mangueras con goteros en los surcos del biohuerto.

- *Siembra*: Previo a esta etapa, durante cuatro semanas, se almacenaron las semillas de hortalizas, aromáticas y forestales.
- Hortalizas, se combinó sustrato de lodo (Lecho de secado) y abono de carnero, para la lechuga variedad Viroflax, la lechuga de mesa y espinaca, con 90% de germinación; betarraga con 85% de germinación.
- Aromáticas, no germinó debido a los cambios de temperatura.
- Forestales se almacenó semillas de pino radiata, empleándose sustrato y humus de lombriz, lográndose 80% de germinación. Según los estudios indicados por la UNALM, esta variedad de pino es óptima para la sierra del Perú, a altitudes promedio entre 2800 a 3400 msnm (Foto 10).

Las plantas ornamentales, así como las variedades de geranio y gladiolo, se sembraron en forma directa al suelo.

Lograda la germinación de un 60% de semillas almacenadas, se procedió al transplante en campo, con separación entre 10 y 30 cm según la especie, a

lo largo de los 37 surcos, correspondiendo un 60% a hortalizas, 20% a plantas ornamentales y el 20% a plantas forestales.



Foto 10. Vista del riego presurizado en almácigos de pino.

El riego recomendado, durante el verano, es según el tipo de cultivo; en el caso de hortalizas, es 3 veces por semana; en ornamentales y las forestales, 2 veces por semana. Durante el invierno, hortalizas podrán ser regadas 2 veces por semana. Forestales, 1 vez por semana.

Una vez instalado el huerto se puso en funcionamiento el SRLAF, verificándose su buen funcionamiento.

Monitoreo

Esta fase se ejecuta desde la instalación del biohuerto, los almácigos, hasta la recolección de muestras de plántulas transplantadas, con 12 a 14 semanas de desarrollo vegetativo para los análisis en el que se caracterizaría el suelo con y sin abono orgánico y el agua proveniente del humedal artificial.

Sensibilización, capacitación y asistencia técnica

Talleres de sensibilización

- En los talleres de sensibilización, participó la población de los anexos y de la capital del distrito de Lacabamba, las autoridades del municipio, la gobernación, el juez de paz, los docentes y alumnos de la institución educativa, el club de madres, las madres del vaso de leche y del comedor popular, y toda la sociedad civil.

En los coloquios y charlas, se trató sobre: el proyecto de Investigación: «Instalación de un humedal artificial, el tratamiento de aguas residuales e instalación de un biohuerto», nuevas técnicas

de regadío y protección del ambiente, y la importancia del Plan de Desarrollo Sostenible del distrito.

Talleres de capacitación

La capacitación se realizó para los docentes, los comuneros, los alumnos de primaria y secundaria, los barrios lacabambinos y los talleres prácticos con los comuneros que trabajaron en el proyecto, tratándose diversos temas de acuerdo al estrato social:

- A Docentes de la Institución Educativa, se les dictó el Curso-Taller: «La educación y el desarrollo sostenible», tratándose temas de educación y desarrollo sostenible; importancia de la planificación estratégica; los recursos naturales y el cuidado del ambiente; diagnóstico ambiental participativo; identidad, valores y liderazgo; agricultura ecológica y biohuerto comunal; y el cuidado del ambiente y el tratamiento de las aguas residuales (Foto 11).



Foto 11. Profesores de primaria y secundaria asistieron a la capacitación Inaugurada por el director del IIGEO-UNMSM.

- Comunidad campesina, participó en las charlas, conferencias y coloquios sobre Plan de desarrollo sostenible del distrito, la realización de proyectos de desarrollo y la aplicación del Proyecto de Investigación.
- Alumnos de primaria y secundaria, participaron en charlas sobre la Educación y el desarrollo sostenible, la importancia de la planificación, identidad y valores, humedales artificiales y el biohuerto, complementándose con visitas guiadas al humedal y biohuerto.
- Barrios de Lacabamba, apoyando a las mujeres de los barrios se realizó charlas y coloquios sobre, el Plan de Desarrollo Sostenible y la aplicación del Proyecto SEMA.

Talleres teórico-prácticos

Considerándose la importancia del proyecto para la población, en el área del humedal y biohuerto, se realizó talleres prácticos, para:

- Los comuneros, en labores de construcción del humedal artificial y la implementación del biohuerto comunal, incluyendo el riego tecnificado (Foto 12).



Foto 12. Comuneros participando en la construcción del humedal.

- La Institución Educativa, a los docentes y alumnos, se les explico el proceso de «Humedales Artificiales y Biohuerto».
- Construcción y operación del humedal artificial y del biohuerto comunal, incluyendo el tema de contaminación del agua y las posibilidades de reuso de las aguas residuales (Foto 13).



Foto 13. Charlas, alumnos de primaria y secundaria.

- Los barrios, donde las mujeres instalaron huertos caseros para cultivar hortalizas y frutales, con el objetivo de mejorar su dieta nutricional y el cultivo de flores para obtener algún ingreso económico.
- Las autoridades, para que apoyen y continúen con el proceso de transferencia de tecnología en la instalación del humedal, de reuso de las aguas tratadas, sistema de riego y el manejo del cultivo en el biohuerto.

Talleres de reforzamiento del saber

- La capacitación de los alumnos y las mujeres, fue reforzada en el área del humedal por los profesores de la Institución Educativa, como parte del curso-taller que se dictó dentro del proyecto.

RESULTADOS

Humedal artificial

Caracterización del agua residual tratada

En el Cuadro 2 se muestra el desempeño del humedal artificial. En este cuadro se detallan los valores, promedios representativos de los parámetros analizados a la entrada y salida del humedal artificial durante el periodo de remoción del contaminante.

Cuadro 2. Desempeño del humedal artificial (valores promedios representativos y desviaciones estándar entre octubre y diciembre del 2005).

Parámetro	Afluente	Efluente	Remoción
Sólidos suspendidos (mg/l)	58,5 +/- 14,5	5,7 +/- 4,19	90,26%
DBO ₅ MG/L	57,7 +/- 33,72	30 +/- 19,9	48%
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	4,83 +/- 0,07	5,45 +/- 2,06	- 0,13%
Fósforo Total (mg/l)	2,2 +/- 0,18	1,2 +/- 0,35	45,45%
Coliformes Fecales NMP/100ML	4,02E6	1,50E6	62,70%

El humedal artificial ha demostrado tener una buena capacidad para eliminar sólidos en suspensión por filtración por parte del suelo.

Con respecto a la remoción de la DBO₅, se obtuvo una remoción del 48%, se espera mejorar este valor en el transcurso de los meses, cuando se alcance una

cobertura vegetal total, en el humedal y por tanto, una densidad de raíces. La densidad de raíces, favorecerá el crecimiento de microorganismos, que degraden la materia orgánica y favorezcan su mineralización ofreciendo estos minerales para el consumo de las plantas.

En el monitoreo se observó, que en Lacabamba, por el clima frío con variaciones de temperatura originó cierta inoperancia en las bacterias, y que la actividad de los microorganismos es muy lenta, la mayor eliminación de materia orgánica se realizó por filtración del medio y por digestión de la fracción carbonada en forma anaerobia [1] por lo que el rendimiento para la remoción de la DBO_5 tiene tendencia a disminuir en este ambiente.

Se considera que una vez alcanzado el desarrollo total de la vegetación se podrá suministrar un efecto de invernadero para ayudar a mantener una cama libre de helada y asegurando una digestión complementaria de la fracción carbonada de forma aerobia [2]. La remoción del nitrógeno amoniacal en el humedal presenta un valor de -0,13%, lo que indica que el nitrógeno amoniacal se ha acumulando en el humedal durante el periodo de muestreo.

Los rendimientos negativos indican la dificultad para la remoción del nitrógeno amoniacal, debido a la falta de oxígeno en el medio, se espera que una vez alcanzada la cobertura vegetal y radicular del carrizo, se mantengan las condiciones secuenciales aerobias y anaerobias, para que las bacterias nitrificantes transformen el nitrógeno amoniacal en nitritos y nitratos en la zona aireada y las bacterias desnitrificantes permitan la transformación de los nitratos y nitritos en nitrógeno gaseoso en las zonas aireadas.

Particularmente, la remoción del fósforo con procesos de tratamiento de plantas es relativamente difícil y los resultados obtenidos son variables. La remoción del fósforo puede implicar dos fenómenos diferentes: la absorción por el suelo y el consumo de las plantas.

La remoción del fósforo en el humedal construido en Lacabamba muestra un valor del 45,45%, considerando incompleto el desarrollo vegetativo del carrizo durante el periodo del monitoreo; la eliminación de fósforo se debió principalmente a la buena capacidad de absorción del medio filtrante. En este caso la composición química del suelo que favoreció la absorción. Cuando se alcance una cobertura vegetal adecuada, las plantas eliminarán el fósforo, porque lo absorberán durante su crecimiento.

La remoción de coliformes fecales en el humedal fue de 62,70%, lo que no es significativo. Particularmente, en este caso no es apto para el uso agrícola ni acuícola, según las normas sanitarias de la Organización Mundial de la Salud, que recomienda una

directriz sobre la calidad bacteriológica de una media geométrica de 1000 coliformes fecales por cada 100 ml, para riego de todos los cultivos y para reuso en agua de estanques con peces [3]. Se espera un mejor rendimiento cuando exista un mayor desarrollo radicular de las plantas en el humedal.

Adaptación y crecimiento de la vegetación

Se observó que el crecimiento del carrizo sembrado en el humedal, se adaptó y propagó lentamente después de dos meses de sembrado, llegando a alcanzar una altura promedio de 0,80 a 1,00 metro, con densidad regular de raíces y una cobertura vegetal del 30%, durante el monitoreo.

Biohuerto comunal

Las muestras de suelo y agua fueron analizadas por el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los análisis realizados fueron los siguientes:

- Caracterización físico-química y,
- Metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr).

El primer análisis fue para conocer las características del agua y del suelo y el segundo, para determinar si existía una posible contaminación, por actividades derivadas de la agricultura en la zona y de la minería en zonas aledañas.

Los resultados determinaron:

- *Suelo sin abono*: es un suelo de textura franca, con tendencia a la acidez, muy ligeramente salino, mediano contenido de materia orgánica y fósforo y bajo contenido de potasio.
- *Suelo con abono de carnero*: mejoró el contenido de materia orgánica, con un muy alto contenido de fósforo y potasio. En este tipo de suelo se estudió el contenido de metales pesados: Pb, Cd y Cr. El contenido de Pb (38 ppm) supera el estándar recomendado de 35. Considerándose un valor alto y que puede incrementarse sin un adecuado tratamiento. En cuanto al Cd (1,25 ppm) y Cr (20,37 ppm) estos valores son bajos, lo cual es un dato favorable, pese al contenido de Pb, siendo esta una característica de contaminación que debe ser tratada oportunamente, el cual está ligado estudios de posibles fuentes contaminantes del suelo por actividades mineras y agrícolas, en zonas aledañas u otras posibles fuentes. Posteriormente se hará una breve descripción de los efectos de metales pesados en caso de ingesta. En cuanto a las demás características podrá decirse que ha mejorado considerablemente con la incorporación del abono de carnero.

- *Agua:* El agua de riego tiene una tendencia media a la salinidad y baja tendencia a la presencia de Na.
- *Planta:* En la actualidad, las hortalizas no presentan mayor variación en su fisiología, más bien, presentan un alto porcentaje de desarrollo foliar en el caso de la lechuga, espinaca y betarraga. Se recomendó el análisis de metales pesados (Pb, Cd y Cr), para las muestras vegetales más representativas del lote de muestreo, como es el caso de la betarraga.

Henk de Zeeuw y Karen Lock [4] citan a Iretskaya y Chien, quienes mencionan que las cantidades mayores de metales pesados se acumulan en las hojas, mientras que los contenidos más bajos se acumulan en las semillas. Siguiendo este principio, se selecciona la betarraga, gracias a su alto desarrollo foliar, frente a los otros tipos de plantas.

Los siguientes resultados así lo comprueban, véase el Cuadro 3:

Cuadro 3. Resultados de las muestras de metales pesados en el suelo.

Muestra del 03-1-06

Parámetro	Valor (ppm)
Pb	26,00
Cd	3,50
Cr	0,00

De acuerdo al cuadro 3, el contenido de Pb y Cd, han superado el estándar mencionado de 13,0 a 26,0 y de 2,40 a 3,50 ppm, considerándose extremadamente muy alto, en el caso del Pb. Por ende, no se recomienda la ingesta de las plantas sembradas en este primer ensayo. Para los casos de las plantas ornamentales y forestales, el estado de desarrollo ha sido el óptimo. Sin embargo, se recomienda que deberá chequearse el estado fisiológico así como ver posibles variaciones en el color, tamaño, entre otras características, frente a la actual contaminación en el suelo.

Capacitación

La población de Lacabamba consolidó y afirmó su compromiso con el Plan de Desarrollo Sostenible, y la importancia del tratamiento de las aguas residuales para el cuidado del medio, son concientes que la contaminación causa los cambios climáticos, originándose los fenómenos de sequías y heladas que perjudican a sus sembríos agudizando la carencia de alimentos y la escasez de pastos para su ganado lanar, vacuno, auquénido, y para los animales menores.

- Participa en el proceso del cuidado del medio ambiente, valorando y apoyando la instalación

del humedal artificial y de un biohuerto usando agua reciclada y con riego tecnificado.

- Se involucró toda la población en el proyecto de Investigación de manera directa a través de las mujeres y de los alumnos, se trabajó con equidad.
- Se logró que las mujeres de los barrios trabajen en equipo. Los proyectos a realizarse a mediano plazo, los están planteando en grupo, hecho que permite intercambiar experiencias y recursos como, semillas obtenidas en sus huertos.
- Se logró sensibilizar y capacitar a los docentes, sobre la importancia del Plan de Desarrollo Sostenible de Lacabamba, así como la importancia de la aplicación del Proyecto SEMA y su relevancia dentro del contexto local, regional, nacional y mundial.
- El proyecto SEMA se realizó en el momento que la población había participado elaborando su Plan de Desarrollo por ello, el proyecto de investigación significó un impulso importante a otros proyectos posibles, como es el caso del proyecto en arqueología impulsado por la Municipalidad de Lacabamba y el Comité de Desarrollo de los Lacabambinos residentes en Lima.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Humedal artificial

- A pesar de los cambios realizados por el personal técnico del II GEO-UNMSM para lograr un relativo mejoramiento de tratamiento, los análisis demuestran que las aguas residuales provenientes del tanque mantienen las mismas características de calidad de agua del afluente, por lo que se considera que el tanque trabaja como un pozo ciego, es decir una cámara que solamente recepciona las aguas servidas de las viviendas sin ninguna función de tratamiento.
- Considerando, que para operar el sistema de tratamiento en el humedal, es importante el trabajo que se realice en el mantenimiento del pretratamiento, por ello, se debe realizar purgas del lodo y del agua residual contenido en el tanque, con el fin de evitar problemas de colmatación en el humedal artificial. Asimismo se recomienda a las autoridades del Municipio de Lacabamba instalar un sistema de pretratamiento de rejillas y desarenador para prevenir la entrada de sólidos gruesos y material inorgánico (arena) en el tanque.
- El desarrollo y propagación del carrizo en el humedal artificial, después de tres meses de sembrado, fue lenta.

El incompleto desarrollo radicular en el suelo, contribuyó a un deficiente desarrollo de bacte-

rias alrededor de las raíces de las plantas, hecho que originó un inadecuado tratamiento aeróbico y un efecto de insolación en el humedal, necesario para mantener una cama libre de variaciones de temperatura (heladas). Se espera que cuando las plantas alcancen una cobertura total en el humedal artificial se obtengan mejores rendimientos en la remoción de la DBO_5 y del nitrógeno amoniacal.

- La remoción del fósforo en el humedal artificial se debió principalmente por una buena capacidad de absorción del medio filtrante (suelo), principalmente por su composición química.
- La remoción de coliformes fecales en el humedal no fue significativa. Se espera un mejor rendimiento cuando exista un mayor desarrollo radicular de las plantas en el humedal. A pesar de no alcanzar los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud para el riego de cultivos y para reuso en agua de estanques con peces, se recomienda usar el efluente para la irrigación de plantas ornamentales o forestales.
- El humedal artificial en Lacabamba se trabajó con una alimentación continua. Se recomienda una alimentación de manera intermitente con periodos de reposo de dos o tres días, para favorecer las condiciones aeróbicas y por lo tanto la degradación de materia orgánica y lograr mayor eficiencia de remoción.
- La eficiencia del tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales se determina realizando análisis periódicos de los parámetros de contaminantes. Se recomienda realizar otros monitoreos para analizar la efectividad del tratamiento del humedal en Lacabamba.

Biohuerto comunal

- El proyecto alcanza su objetivo al demostrar que el agua tratada tuvo unas características físico-químicas adecuadas para el riego de las plantas.
- El proyecto identifica que las plantas (lechuga, betarraga, espinaca) no pueden ser consumidas, ya que se encontraron problemas de contaminación por metales pesados, presentes en el suelo y por ende, en la planta.
- El proyecto identifica que el biohuerto puede continuar su producción en plantas ornamentales y madereras, ya que el agua es óptima para este uso.
- En el caso de plantas de consumo deberán plantarse recomendaciones y medidas de mitigación y control de metales pesados en el suelo.
- Se recomienda el empleo de la técnica de remediación en el suelo para reducir las concentraciones de metales pesados.

Capacitación

- Las actividades de capacitación del Proyecto han permitido sensibilizar al pueblo de Lacabamba, las autoridades del municipio, la gobernación, el juez de paz, los docentes y alumnos de la institución educativa, el club de madres, las madres del vaso de leche y el comedor popular, y toda la sociedad civil en temas ambientales y productivos, fortaleciendo el apoyo al Plan de Desarrollo Sostenible del Distrito.
- La implementación del sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en pequeñas comunidades de zonas andinas de altitud constituye una innovación tecnológica en el Perú. Asimismo, la participación de las autoridades locales y de toda la población en la implementación y operación del humedal artificial y el biohuerto valida socialmente la iniciativa.
- La Universidad a través del IIGEO propone promover esta experiencia en comunidades vecinas como estrategia para la gestión sustentable del agua.
- El desarrollo del proyecto forma parte de las acciones emprendidas por el Plan de Desarrollo Sostenible Concertado del distrito de Lacabamba al 2012. El proyecto de investigación realizado con la participación de toda la comunidad, es una clara evidencia de la institucionalización de la propuesta en los ámbitos de participación multisectorial local y planificación local.
- Esta investigación plantea una propuesta concreta, para el manejo de las aguas residuales domésticas, dentro del marco de una gestión sostenible del agua que podría promover instrumentos legales de política ambiental a mayor nivel que el local.

AGRADECIMIENTO

El equipo técnico del proyecto desea expresar su agradecimiento a los ingenieros Orlando Ipanaque Nizama y Daniel Enciso Melgarejo, integrantes del staff del IIGEO-UNMSM, por sus acertadas sugerencias y su constante disposición a prestar el apoyo necesario para la culminación del proyecto.

Asimismo agradecemos a los ingenieros Daniel Núñez Ato y Helga Valdivia Fernández por el trabajo prestado en el proceso de la Consulta Ciudadana del Plan de Desarrollo Sostenible Concertado del Distrito de Lacabamba.

Agradecemos también al alcalde de la Municipalidad distrital de Lacabamba Sr. Ysaías Filomeno Mariños Pérez, a sus regidores y su personal técnico por la ayuda prestada durante todas las etapas del proyecto.

El II GEO-UNMSM desea agradecer en especial al Sr. Walter Ubal, Director Ejecutivo del SEMA, quien monitoreó los aspectos técnicos del trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sociedad Quebequence de Saneamiento de Aguas. (1999). *Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades*. 2ª ed., Colombia.
2. Quipuzco, L. (2002). *Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con Phragmites australis para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
3. Organización Mundial de la Salud. (1989). *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura*. Ginebra.
4. Henk de Zeeuw & Karen Lock. (2000). «La agricultura urbana y peri-urbana, salud y medio ambiente urbano». En *Documento de discusión para la Conferencia electrónica de FAO-ETC/RUAF sobre la agricultura urbana y peri-urbana*.